

智能制造和工业互联网融合发展初探

陶永¹, 蒋昕昊², 刘默², 刘继红¹, 赵罡¹

(1. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191; 2. 中国信息通信研究院
信息化与工业化融合研究所, 北京 100191)

摘要: 智能制造、工业互联网的实质均为数据驱动的智能化工, 二者融合发展可为传统产业重点领域的新兴裂变和升级演进, 芯片、基础软件、算法与机理模型等基础能力拓展提供关键的驱动力。本文分析了智能制造和工业互联网融合发展的宏观需求, 梳理了智能制造、工业互联网产业的发展现状及趋势, 阐述了二者融合发展的机遇, 进一步凝练我国智能制造和工业互联网产业体系存在的问题。在产业发展策略方面, 建议大力发展新兴领域、布局关键支撑环节、逐步追赶传统部分; 在重点发展方向方面, 建议突破核心必争领域, 抢抓新兴机遇领域, 追平替代可控领域。构筑各类主体充分参与协同的产业生态, 强化人才造血功能, 加快技术突破向商业成功转变, 支撑智能制造和工业互联网产业的快速健康发展, 并为工业转型升级提供基础保障。

关键词: 智能制造; 工业互联网; 产业链; 智能装备; 工业软件

中图分类号: TH166 **文献标识码:** A

A Preliminary Study on the Integration of Intelligent Manufacturing and Industrial Internet

Tao Yong¹, Jiang Xinhao², Liu Mo², Liu Jihong¹, Zhao Gang¹

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Beihang University, Beijing 100191, China; 2. Informatization and Industrialization Integration Research Institute, China Academy of Information and Communications Technology, Beijing 100191, China)

Abstract: Data-driven intelligence is the essence for both intelligent manufacturing and Industrial Internet. The integration of intelligent manufacturing and Industrial Internet can promote the transformation and upgrades of key areas of traditional industries and enhance research support for basic capabilities such as chips, basic software, algorithms, and mechanism models. This study analyzes the macro-demands for the integration in China, elucidates the development status and trends of intelligent manufacturing and Industrial Internet industries, and elaborates the opportunities and challenges for the integration. On the whole, we suggest developing emerging areas of the Industrial Internet industry, focusing on the key upstream links in intelligent manufacturing, and catching up with international advanced levels in traditional fields. Specifically for the Industrial Internet industry and its integration with manufacturing, China should make breakthroughs in the core areas, seizing opportunities to develop the emerging areas, and strengthening its efforts in the uncompetitive areas. Moreover, an industrial ecosystem with full participation of all entities should be established, talent training be strengthened, and commercial transformation of technological breakthroughs be accelerated, so as to support the rapid and healthy development of China's intelligent manufacturing and Industrial Internet industries and provide basic guarantees for industrial transformation and upgrades.

Keywords: intelligent manufacturing; Industrial Internet; industry chain; intelligent equipment; industrial software

收稿日期: 2020-04-26; 修回日期: 2020-06-19

通讯作者: 陶永, 北京航空航天大学机械工程及自动化学院副研究员, 研究方向为智能制造、智能机器人控制与集成应用;

E-mail: taoy@buaa.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“‘互联网+'行动计划战略研究(2035)”(2018-ZD-02)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

一、前言

当前,世界产业变革逐步兴起,制造业价值凸显,但也面临着生产运营成本亟需降低、产品质量和价值有待提升等问题。制造业高质量发展离不开智能化变革。随着数字经济的蓬勃发展,工业制造与信息技术(IT)融合程度趋于深化,推动传统产业加速变革[1,2]。新型网络强化互联基础、云计算加速应用创新、人工智能(AI)促进价值挖掘、开源开放助推生态构建,这些都标志着传统产业在技术创新的不断推动下出现了重大变革。

主要工业国家纷纷提出了新型制造业智能化升级发展战略:以智能制造和工业互联网为核心,提出综合性的政策体系来推动发展,抢占新一轮工业变革制高点。美国注重信息技术的创新引领,推出了《先进制造伙伴关系计划》《先进制造业战略规划》《美国先进制造领导力战略》等规划。德国重视信息物理系统的创新应用,发布了《新高科技战略(3.0)》《德国工业战略2030》《信息物理系统驱动的交通、医疗、能源与制造创新》等规划,率先提出工业4.0战略[3,4]。我国将信息技术与工业制造融合作为发展重点,发布了《智能制造发展规划(2016—2020年)》《国务院关于深化“互联网+先进制造业”发展工业互联网的指导意见》等文件,将智能制造作为国家先进制造产业的重点突破方向,以工业互联网为网络化平台,推动工业制造向数字化、智能化转型升级[5,6]。

智能制造以工业互联网为基础支撑,应用于设计、生产、制造、管理、服务等诸多环节,具有高效精准决策、实时动态优化、敏捷灵活响应等特征[7,8]。工业互联网依托“人/机/物”的互联互通,打通产业要素、产业链和价值链,推动建立工业生产制造与服务新体系,奠定了全新工业生态和新型应用模式的关键基础[9]。智能制造、工业互联网的实质均是数据驱动的智能化,二者融合发展相得益彰[10]。面向未来,可形成以网络互联为基础、以工业互联网平台为核心的信息制造体系,打造制造业新生态,这对我国制造业发展将产生深远的影响[11]。智能制造和工业互联网推动传统产业的重点领域出现新兴裂变和升级演进,芯片、基础软件(开源)、算法与机理模型等基础能力有望拓展范围,逐步建立智能制造和工业互联网产业体系(见图1)。

本文针对智能制造与工业互联网融合发展问题,分析当前世界各国的发展形势,而后针对四方面构成内容进行了研究现状及趋势的调研研究,点明我国智能制造和工业互联网融合发展的需求;梳理智能制造产业链重点环节的发展机遇,结合我国发展情况指出当前存在的挑战及关键问题;提出我国智能制造和工业互联网融合发展的建议,以期为国家工业制造转型升级研究提供理论参考。

二、智能制造和工业互联网融合发展的需求分析

(一) 制造业智能化对平台工具提出新的需求

1. 工业数据爆发式增长需要新的数据管理工具
伴随着工业系统空间扩展概念的深化,工业数据采集范围不断扩大,与之而来的是数据类型和规模出现了爆炸式增长。降低海量数据的管理成本并提高存储可靠性,亟需新型数据管理工具。

2. 推进企业智能化决策需要新型应用创新载体
制造企业开展更加精细化和精准化的管理离不开丰富的数据。随着工业场景层次化和交叉程度的加深,不同行业的数据与知识体现的专业壁垒,使得传统应用创新模式难以匹配企业/行业的差异化需求。新型应用创新载体可以依托实际工业数据、抽象工业知识,结合功能完整的平台调用方式,破解应用创新壁垒,支持智能化应用迅猛增长的需求。

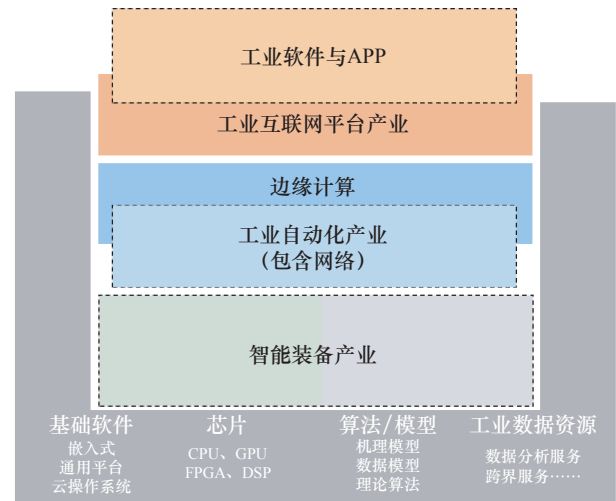


图1 智能制造与工业互联网产业体系的耦合关系
注: APP代表应用程序; CPU代表中央处理器; GPU代表图形处理器; FPGA代表现场可编程逻辑门阵列; DSP代表数字信号处理。

3. 新型制造模式需要新的业务交互工具

随着产品更新速度加快，制造企业之间需要更为频繁的资源协同和生产并行。这就要求在企业设计、生产和管理系统等方面，都要更好支持与其他企业的业务交互。新型交互工具应运而生，主要包括高效集成的差异化主体与系统。

(二) 信息技术加速渗透引起制造业发展模式变革

制造业数字化升级与新型信息技术存在紧密联系。为了推进数字化升级，制造企业依托物联网大量采集来自于设备和产线且类型多样的数据，基于云计算方式获得灵活便捷的软件应用环境、可靠且廉价的数据存储能力，利用 AI 来加强数据挖掘能力。制造企业利用互联网平台，能够快速响应市场需求、高效整合资源组织生产经营，进而推动产生网络化协同、特色化定制等新的模式。信息与制造技术的融合发展，促使新经济模式在工业领域中的渗透革新。

三、智能制造与工业互联网发展情况

智能制造与工业互联网产业是支撑未来新型工业制造能力体系的重要方面，又可细分为高端智能装备、工业自动化、工业软件与应用、工业互联网平台四部分。

(一) 高端智能装备

制造装备的高端市场拓展与基础技术研究仍需深耕，智能化是终极演进方向。制造装备智能化是先进制造技术、信息技术、智能技术的集成和融合，主要判断标准在于能否实现感知、分析、推理、决策、控制等功能。智能制造装备是智能制造的重要构成，包括工业机器人、数控机床和增材制造设备等硬件工业基础设施，智能控制软件系统和以传感器为代表的检测设施。

当前，我国智能装备产业在低端市场具备一定的基础，但高端市场占比较低，基础工艺与算法成为关键技术方面的重要短板 [12]；还存在着创新能力薄弱、市场规模小、产业基础不牢等问题。例如，国产化产品主要集中在中低端（搬运、喷涂机器人，中低档机床等）。

工业机器人远程监控与故障诊断技术是该领域的研究热点。瑞典 ABB 公司率先研发了用于远程监控工业机器人的服务平台，减少工业机器人故障造成的损失和运营成本 [13]。美国研究团队 [14] 从故障特征入手，以扭矩和温度为控制量实现了机械臂的远程监测。

目前，智能控制系统方面处于被国际大型企业垄断的状态：欧美企业占据了全球前 50 强的 74%，而美国企业更是占据前 10 位中的一半；国内 90% 以上的高档数控机床控制系统市场被国外产品占据。

传感器等检测设施、控制设备、核心零部件等重要工业设施的关键技术方面存在短板。相关产品的研发较多地追随国外技术方向，先进性和前瞻性方面的差距较为明显。此外，专业生产水平不高、忽视个性化服务等问题也成为制约行业发展的因素。

智能化、网联化的发展趋势将促进装备的协同智能演进，智能装备产业的新核心、新环节、新主体将会不断涌现 [15]。协同优化离不开单点增强，第五代移动通信（5G）技术推动互联和智能演进，我国 5G 技术设备供应商成为装备产业的重要参与者；AI 芯片是智能装备产品的核心部件，国内企业涉足以自动驾驶为代表的诸多领域，发展速度令人瞩目。

(二) 工业自动化

工业自动化涵盖工业控制、工业网络、工业传感器等多类产业，主要提供感知、控制、传输等类别的产品与解决方案，支持实现运营技术（OT）层面的智能制造能力。我国已部分实现国产化产品替代，但关键市场与技术的把控力仍然不强，核心产品与标准仍由国际企业主导。

在工业控制系统方面，德国企业在大中型可编程逻辑控制器（PLC）方面具有优势，全球市场份额为 31%；国内企业主要在小型 PLC 方面占有部分份额。在技术层面，国外企业依然保持着微控制单元（MCU）、数字信号处理（DSP）、现场可编程逻辑门阵列（FPGA）等核心元器件技术的垄断地位 [16]。

在工业网络方面，国外自动化企业掌控了主要

市场以及网络核心标准。我国企业处于产业边缘环节，格局基本固化，短期难有改变。

在工业传感器方面，美国、日本、德国获得的全球产业份额约为 60%；国内企业虽然增长迅速，但仅占全球市场份额的 10%。在技术层面，国外大型企业几乎垄断了以敏感芯片为代表的核心元器件关键技术，牢牢把握市场主导地位。以高温高压传感器为例，2004 年美国科研机构成功研制了 SiC 压阻式压力传感器，工作温度达到 400 °C [17]；2015 年马来西亚高校以 3C-SiC 为主要材料研制高温压力传感器，工作量程为 5 MPa，工作温度高达 500 °C [18]。2017 年中国电子科技集团有限公司第四十九研究所通过技术引进和增量创新，研制的压力传感器量程达到 100 MPa [19]。

着眼未来，新型算法将支撑产品形态和功能的变革，自动化与云计算企业将联合推动工业自动化向边缘智能发展。在产业层面则顺应技术发展趋势，由自动化企业牵头投资并整合 AI 研发，通过产品智能化升级来巩固市场地位。

（三）工业软件与应用

工业软件是指在工业场景下进行研发设计、生产管理、运营管理的各类软件。工业软件正从复杂系统软件向便捷平台转变，工业 APP 成为工业软件的新型形态。工业 APP 基于平台，承载工业知识和经验，运行在各类工业终端，以处理某类业务问题或面向某类业务场景为主，具有轻量化特征。

当前，我国工业软件研发设计产品缺失，市场规模小（但增速较高），关键技术积累缺乏。根据公开数据整理发现，我国市场上的计算机辅助工程（CAE）软件，前 10 名几乎属于国外厂商。2015 年，我国占全球工业应用软件市场的份额为 3.5%，但增速（10.2%）远高于全球整体情况（0.47%）。

在生产控制软件领域，德国企业依然占据明显优势，基于产品生命周期管理（PLM）架构提出了全集成性数字化解决方案，打通了制造工厂的多层次信息交互 [20]。在电力、钢铁冶金和石化行业等国家重点领域，国内企业占据一席之地 [21,22]。

在技术方面，国内企业基本不具备 CAE 有限元算法和计算机辅助设计（CAD）核心几何内核算法，只能通过授权经营的方式使用；相关行业模型

积累薄弱，仅能实现基本功能，但专业性、灵活性等存在不足。

着眼未来发展，通过软件架构的优化来推进工业 APP 成为新形态，软件全面云化将促进订阅形式脱颖而出。软件架构技术将体现出微服务化、容器化、方法与系统（DevOPS）等形式和理念，管理、仿真设计、生产控制等各类工业软件的全面云化即将来临。

（四）工业互联网平台

工业互联网平台作为工业云平台，旨在推进制造业的数字化、网络化、智能化，涵盖集海量数据采集和分析于一体的服务体系，支撑制造业资源弹性供给、广泛链接、高效配置 [23]。构建针对工业大数据相关处理的开发环境，实施相关抽象知识经验的模型化、数字化、标准化。优化工业生产中设计制造与运营管理等环节的资源使用，形成资源整合、合作共赢的制造业变革新型生态 [24]。

发达国家的诸多行业和企业已经将工业互联网平台作为主要战略方向，开展符合自身特点的平台布局建设，如打通企业 IT 数据与 OT 数据的通用电气 Predix，针对工业设备和工业系统需求，具有物联网操作系统特征的西门子 MindSphere 等 [25]。

我国正在大力推进工业互联网平台建设，形成了一定的规模和体系，但核心能力距离国外先进水平还有较大差距。目前，国内较有影响力的工业互联网平台已经有 50 余家，平台连接的平均设备数量达到 5.9×10^4 台。工业互联网产业联盟（AII）对 168 家企业的评估数据显示，平台提供分析工具数量不足 20 个的占比约为 83%，提供工业机理模型数量不足 20 个的占比约为 68%，提供微服务数量不足 20 个的占比约为 54%。国内的互联网通信行业企业与机械制造企业启动了战略合作，力争发挥并融合线上与线下不同领域的技术优势，搭建多层次发展体系 [26,27]。

着眼未来发展，行业领军企业主要采用 4 种模式来布局规划工业互联网平台：自动化企业依靠工业设备创新服务模式，制造企业推进数字化转型构建工业互联网平台，软件企业借助工业互联网平台实施业务升级能力拓展，信息技术企业推动已有平台向制造领域延伸。

四、我国智能制造和工业互联网融合发展机遇分析

(一) 产业链加速演进，主导权分散于多个重点环节

随着智能制造产业逐渐成熟、工业互联网市场竞争趋于加剧，由“专用芯片、专业算法知识封闭，龙头厂商垄断”的传统产业链格局，加速向“芯片、开源操作系统、算法与机理模型、基于数据的新型服务这四大重点环节成为未来产业主导权关键”的新兴产业链格局转变，促进整个产业体系演进升级。

传统产业链围绕工业软件、工业网络、工业控制、工业传感、装备产品等细分领域，构建以元器件 / 基础技术 + 操作系统 + 数据库 / 嵌入式系统组成的产业链上游、整机 / 软件组成的产业链中游、集成 + 服务组成的产业链下游的产业格局。

随着 AI、云计算、大数据、边缘计算等信息技术的发展应用，新兴产业链由“工业软件 + 工业自动化 + 装备产品”朝着“工业互联网平台 + 边缘计算 + 智能装备产品”这一新型产业格局转变（见图 2）。新兴产业链聚焦中游整机发展，推动信息技术的延伸布局，如产业上游的芯片、基础软件企业，

产业下游的服务企业等。AI 芯片、FPGA、CPU 等作为底层硬件基础，支撑工业领域的算力需求，成为新兴产业的关键和通用要素。

(二) 基础软件受制于人，开源成为破局的关键

现阶段基础软件领域蓬勃发展，开源正在成为构建基础软件的重要方式和支撑生态。随着开源模式的迅速成熟，开源在智能制造、工业互联网领域得到拓展应用。以容器、微服务、计算框架为代表的 3 类核心开源技术，已经成为变革传统基础软件生态、实施功能解耦再集成的关键。

目前，容器引擎与编排工具两类核心项目由国外公司主导，微服务核心工具与新型架构由国外公司或基金主导，主流计算框架均由国外公司或基金主导。在基础工业软件领域，我国对开源技术的自主可控与话语权有待提升，3 类核心开源方向尚无自主项目，国内企业在相关领域发展基本空白。

面向未来，针对 AI 和机器人的工业开源可能颠覆当前的基础软件格局。一方面，AI 等信息技术新兴领域成为工业开源技术探索热点，有望为基础软件带来新突破；另一方面，开源机器人 / 机床控制系统可能成为控制的核心，有望打破工业控制系统的传统格局。

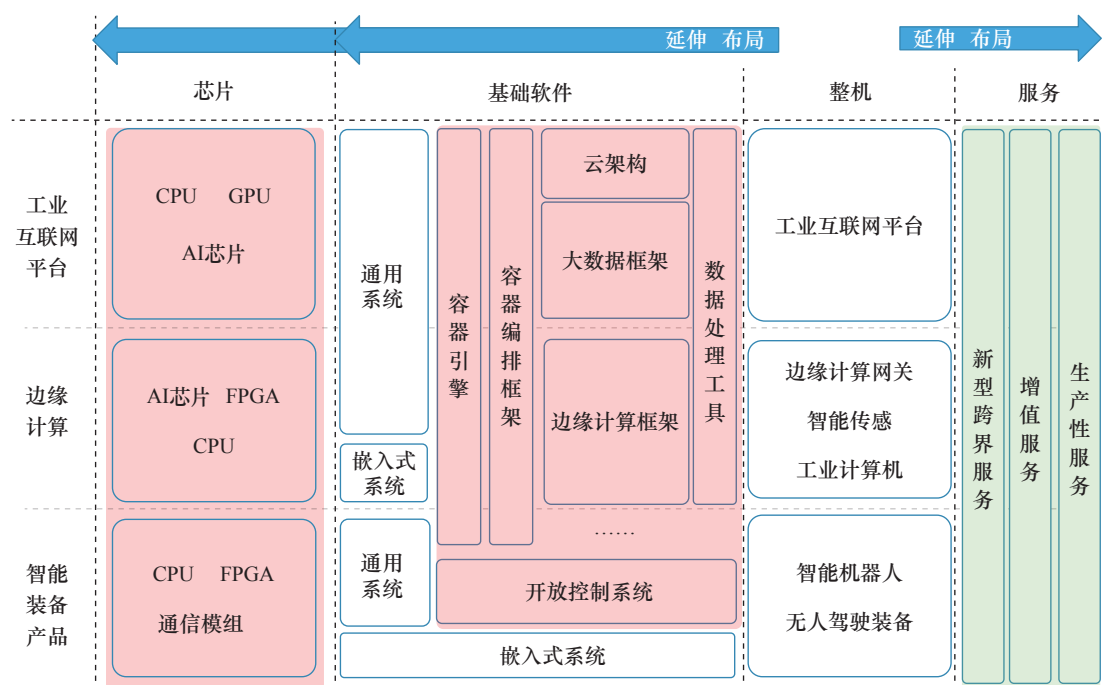


图 2 由工业互联网平台、边缘计算和智能装备产品构成的新兴产业链格局与架构

（三）通过与 AI 等新技术的深度融合，算法与机理模型有望构建新产业

算法和机理模型是工业知识与经验固化的成果。在传统上，通过工业知识和经验来验证工艺仿真流程与设备控制，进而促进工业生产过程优化。当前，算法和工业机理研究集中在仿真软件和底层设备（见图 3）：工艺仿真方面的算法和机理模型固化于产品之中，工业装备方面的运动和控制算法多集成于整机之中。

通常算法和工业机理集成于整机，难以解耦和抽象。国外公司对高端算法与机理模型拥有自主知识产权，并与旗下产品紧密耦合，形成了事实上的技术垄断。国内企业难以接触核心算法与机理模型，较少拥有自主知识产权的关键算法，使得我国的仿真、控制等核心算法以及燃气轮机与航空发动机、复合材料加工等高价值工业机理模型，在研发水平、创新创造、人才培养等方面体现出了明显的差距。

算法与机理模型进行解耦和沉淀并与新技术进行深度融合，深刻影响了新兴产业领域：新型数据科学的兴起推动工业机理中的数据分析应用，工业互联网平台的建立有利于加快机理模型和数据模型的积淀。AI 成为未来产业焦点，工业互联网平台成为重要媒介。在数据、机理、知识沉淀和软件功能进一步解耦的基础上，海量的第三方开发者将显著加快工业 APP 的开发与交付，推动模型的快速迭代和应用创新。

（四）跨界服务、增值服务、生产性服务等新型服务不断涌现

工业互联网的持续发展，推动了跨界服务、增值服务、生产性服务等新型服务的迅猛发展。现代服务体系日益丰富，传统服务形式的不足逐渐由新

型服务的优势所弥补。

传统服务形式利润空间小，易受上游环节的把控：传统自动化集成厂商行业壁垒低，企业数量众多而利润偏低；传统信息化集成产品服务模式单一，极易受到上游牵制。而工业互联网催生的新型服务形式，以数据分析为驱动，以工业互联网平台、大数据软件为载体，已经成为产业生态中不可或缺的环节：大型装备企业在设备融资租赁与保险领域跨界布局，工业互联网平台成为主要服务媒介；基于客户个性化需求的增值服务发展迅速，家电、汽车等领域成为主要突破口；生产性服务逐步聚焦供需对接平台 and 专业化咨询服务，助力工业制造企业资源与解决方案的共享。

伴随着工业互联网研究的逐步深入，有望衍生出更多的新型服务模式，持续充实和补强新型服务体系；加速工业领域的数字化、智能化转型升级，促进传统产业生态的重大变革。

五、对策建议

（一）总体策略

在我国工业互联网产业体系中，不同领域的发展态势及其重要性不尽相同，整体来看可采取“大力发展工业互联网新兴领域，布局规划智能制造的关键上游环节，逐渐追赶传统部分”的分类施策原则。

梳理工业互联网产业体系的子领域与产品，应重点发展 4 个区域（见图 4）：①巨头垄断区域，多为我国长期薄弱的产品领域，相关的技术和市场在短时间内难以冲破；②替代可控区域，我国具有一定基础，但在高端市场与国际领先水平还存在差距；③新兴机遇区域，我国与国际保持同步，有关技术和市场的竞争格局尚未锁定，处于产业壮大的机遇期，相关技术也可辐射至其他领域；④核心必争区域，包含芯片、基础软件/开源、算法与机理模型以及基于数据的新型服务，这是未来产业发展的关键技术，也是其他领域智能化革新的共性基础。

（二）重点方向

1. 突破工业互联网核心必争领域

加强多学科、多领域、跨界协同的技术研发与应用创新，持续积累优质代码、高端算法与机理模

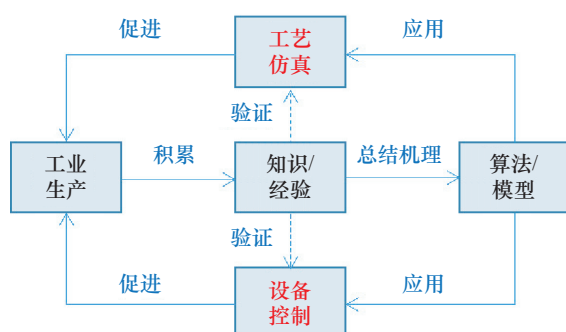


图 3 工艺仿真的算法、机理模型与设备产品的关系

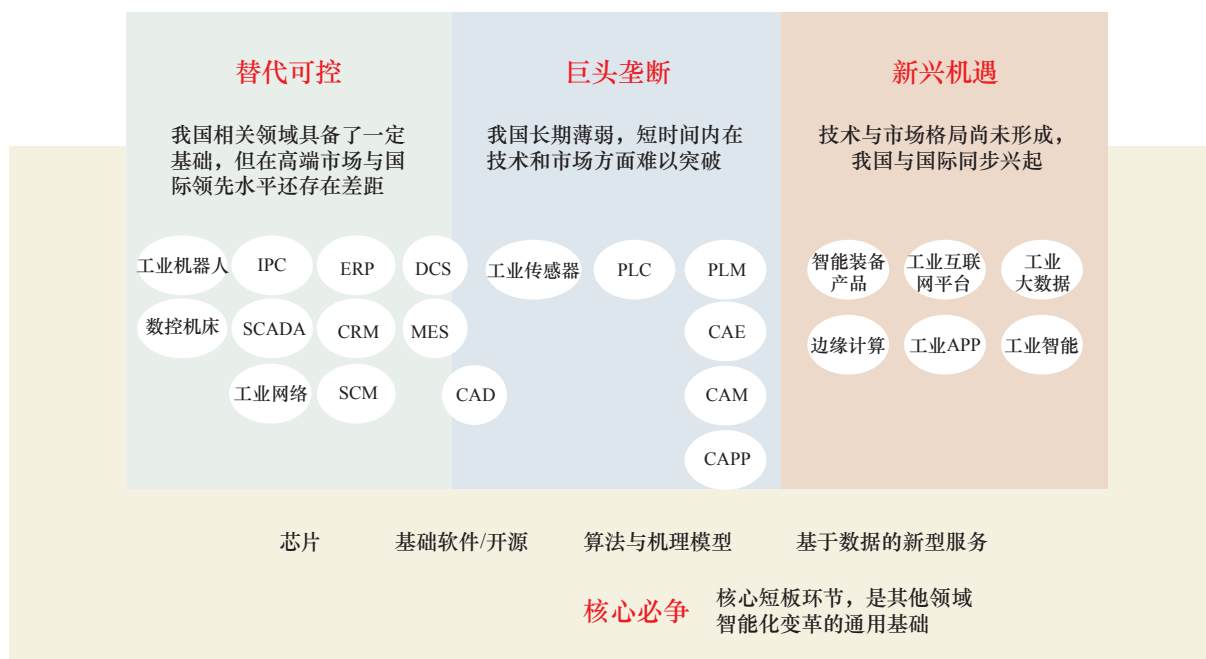


图4 工业互联网产业发展施策区域

注：IPC表示工业计算机；ERP表示企业资源计划；DCS表示分布式控制系统；SCADA表示数据采集与监控系统；CRM表示客户关系管理；MES表示制造企业生产过程执行管理系统；SCM表示供应链管理；CAM表示计算机辅助制造；CAPP表示计算机辅助工艺过程设计。

型。①聚焦面向工业智能等特定领域的芯片设计，在芯片制造方面稳步缩小差距。②加强开源框架和架构方面的研发力度，通过市场优选出由我国企业主导的底层框架与架构；深化微服务与容器技术的工业应用，及时布局 OT 开源技术。③持续积累有关智能制造的关键零部件数字化模型、高端装备和流程行业工艺机理模型，掌握运动控制与仿真等核心算法。④引导企业深化工业数据的挖掘利用，围绕产品、资产、生产与供应链开展数据增值业务，着力创新供应链金融、融资租赁等产融联合服务。

2. 抢占工业互联网的战略新兴领域

推动传统产品与新技术的融合，提出面向特定工业场景的解决方案。①智能装备产品方面加快5G、AI等技术应用，提升装备的人机协作、智能优化功能。②加强工业互联网平台的开源技术自主研发能力，以龙头企业为主体构建开发者生态，注重工业软件 APP 开发，探索形成平台自主造血的商业模式。③开发适应智能化管控与决策要求的通用工业智能算法与模型，提出面向工业实际场景的特定解决方案，匹配工业大数据与工业智能实际应用需求。④开发具有计算模块的工控机、智能网关等边缘计算产品，丰富边缘计算的适用

场景和解决方案。

3. 追平替代可控领域

重点行业持续提升装备、工业自动化、工业软件的国产化率，改进和优化产品性能参数、稳定性与可靠性。①打造高稳定性、高可靠性的国产工业机器人与数控机床产品，努力提升高端型号的技术参数并拓展场景适用范围。②进一步提升 DCS/SCADA 在能源电力、大型石化等高端领域的市场份额。③对于 MES，丰富面向特定行业的解决方案，形成若干具有市场竞争优势的品牌产品。④鼓励企业积极布局基于服务的跨平台解决方案（OPU-UA）等新型工业网络协议，提升领域话语权。⑤提升 ERP、SCM、CRM 等经营管理类软件产品的数据分析挖掘与商业智能决策能力，提供更高水平的数据增值服务能力。

4. 追赶巨头垄断领域

把握新兴领域对于传统产品、解决方案的颠覆与革新趋势，设立自主产品的应用“试验田”，通过扎实研究来改良性能并缩小与国外产品的差距。①提升工业传感器高端产品的性能指标，重视敏感材料研发，能够做到替代可控。②研究开源、边缘计算等对于 PLC 产品的影响，及早布局颠覆性技术应用。③研发设计类工业软件覆盖 PLM、CAD、

CAE、CAM、CAPP 等方向, 积累航空、航天、船舶、石化、材料等领域的模型、仿真算法和分析经验; 设立国产工业软件“试验田”, 开展国内外软件产品的应用比较分析研究。

(三) 兼顾技术突破和商业成功

1. 加强智能制造和工业互联网融合的技术攻关
着眼于企业技术需求这一出发点, 既包括针对特定场景的单个式“小”突破, 也涉及重大领域、重大技术方向的集中式“大”突破(见图 5)。前者借助“产学研”协同的服务机构/平台, 建立企业与高等院校、科研院所之间联合的精干技术团队; 后者应构建龙头企业牵头的联盟/创新综合体, 集中开展技术攻关。通行共性服务、“专精特新”企业培训, 是实施技术突破的关键支撑, 可由政府投资撬动并以企业资源为主体。

2. 重视智能制造和工业互联网融合的商业成功
针对智能制造行业的共性需求, 在研发技术解决方案之后, 通过“试验田”、首台(套)保险等形式的资金对国产产品应用提供支持, 注重商业运行的可持续性。对于中小企业的个性化需求, 在提出/竞标项目时提供详细的技术方案, 开展包含商业分析在内的多方位评估, 通过商业推广平台来为

中小企业提供更低成本拓展市场的条件。

(四) 加强各类复合型人才的培养培育

高等院校和科研院所重点培养高层次、科技创新型人才, 支持培育具有科技战略视野的企业家, 探索设置 AI、工业大数据等前沿学科/专业, 提出多学科培养计划并注重校企联合培养。各类高层次人才引进计划应向智能制造和工业互联网领域适当倾斜, 可聘请企业家、技术专家作为客座讲师。完善成果评价认定机制, 合理提高对工业机理模型、算法、工业 APP 等成果的认可度, 保障对人才的合理激励。

企业应注重培养或引进兼顾技术与管理、IT+OT 的复合型人才, 同时加强专业性技能人才的培养力度。探索联合培养与资质认证, 鼓励信息化部门与自动化部门的人员轮岗, 加强技术人才的国际性学习培训。合理支持高层次人才“产学研”跨界流动, 开辟国际化人才引进绿色通道; 鼓励有条件的企业在海外成立研究中心, 构建引智网络。针对性提高公众科技素养、技术工人专业素养, 培养产业政策设计、产业管理与公共服务类别的专业人才。结合产业发展特点, 建立适应公共服务能力需求的专业性政府机构队伍, 强化智库建设和研究。

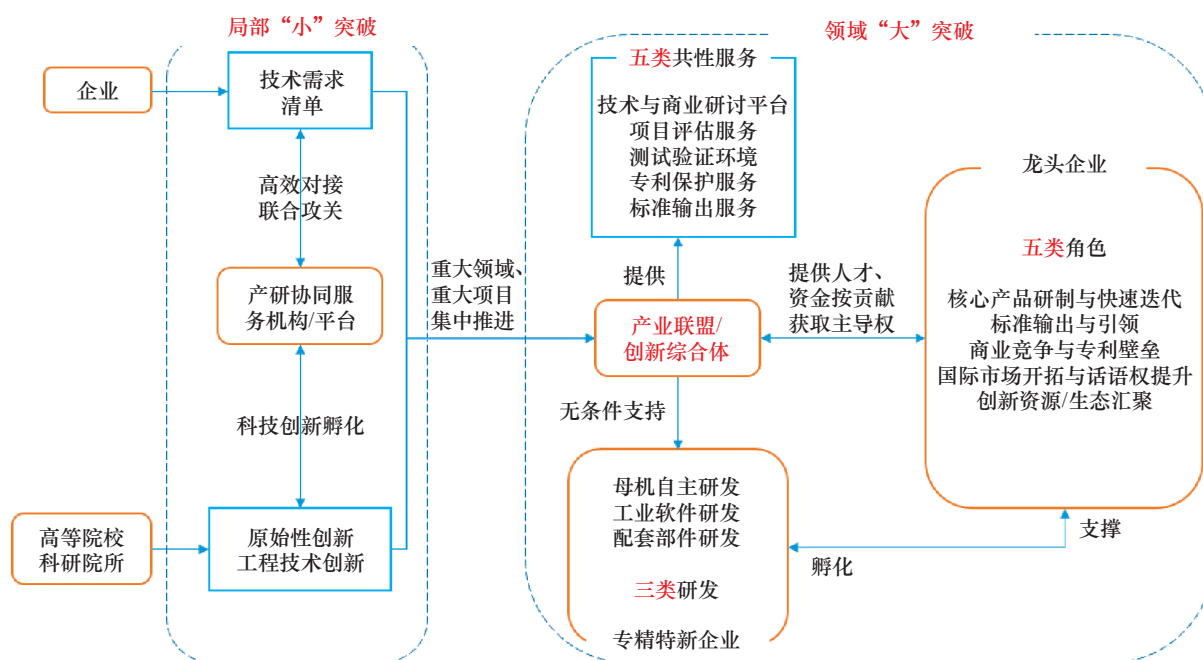


图 5 技术攻关单点式“小”突破和集中式“大”突破示意图

参考文献

- [1] 周济. 制造业数字化智能化 [J]. 中国机械工程, 2012, 23(20): 2395–2400.
Zhou J. Digitization and intellectualization for manufacturing industries [J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(20): 2395–2400.
- [2] 臧冀原, 王柏村, 孟柳, 等. 智能制造的三个基本范式: 从数字化制造、“互联网+”制造到新一代智能制造 [J]. 中国工程科学, 2018, 20(4): 13–18.
Zang J Y, Wang B C, Meng L, et al. Brief analysis on three basic paradigms of intelligent manufacturing [J]. Strategic Study of CAE, 2018, 20(4): 13–18.
- [3] 工业互联网产业联盟. 工业互联网构筑第四次工业革命的基石——国际工业互联网发展跟踪研究 [J]. 中国电信业, 2019 (3): 19–23.
Alliance of Industrial Internet. Industrial Internet builds the cornerstone of the fourth industrial revolution: Tracking research on the development of international Industrial Internet [J]. China Telecommunication Trade, 2019 (3): 19–23.
- [4] 王喜文. 从德国工业4.0战略看未来智能制造 [J]. 中国信息化, 2014 (15): 8–9.
Wang X W. Future intelligent manufacturing from the perspective of German industry 4.0 strategy [J]. China Informatization, 2014 (15): 8–9.
- [5] 延建林, 孔德婧. 解析“工业互联网”与“工业4.0”及其对中国制造业发展的启示 [J]. 中国工程科学, 2015, 17(7): 141–144.
Yan J L, Kong D J. Study on “Industrial Internet” and “Industrie 4.0” [J]. Strategic Study of CAE, 2015, 17(7): 141–144.
- [6] 周济. 走向新一代智能制造 [J]. 中国科技产业, 2018 (6): 20–23.
Zhou J. Move towards a new generation of intelligent manufacturing [J]. Science & Technology Industry of China, 2018 (6): 20–23.
- [7] 周济. 智能制造——“中国制造2025”的主攻方向 [J]. 中国机械工程, 2015, 26(17): 2273–2284.
Zhou J. Intelligent manufacturing: Main direction of “Made in China 2025” [J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(17): 2273–2284.
- [8] 陈肇雄. 工业互联网是智能制造的核心 [J]. 中国信息化, 2016 (1): 7–8.
Chen Z X. Industrial Internet is the kernel of intelligent manufacturing [J]. China Informatization, 2016 (1): 7–8.
- [9] 朱剑英. 智能制造的意义、技术与实现 [J]. 机械制造与自动化, 2013, 42(3): 1–6, 10.
Zhu J Y. Significance, technologies and implementation of intelligent manufacturing [J]. Machine Building & Automation, 2013, 42(3): 1–6, 10.
- [10] 董菁. 余晓晖: 大力推进工业互联网建设 赋能制造业转型升级 [J]. 自动化博览, 2019 (4): 22–25.
Dong J. Yu Xiaohui: Promote the construction of Industrial Internet to empower the transformation and upgrading of manufacturing industry [J]. Automation Panorama, 2019 (4): 22–25.
- [11] 陈懿. 工业互联网在智能制造中的应用 [J]. 信息技术与标准化, 2017 (8): 25–27.
Chen Y. Application of Industrial Internet in intelligent manufacturing [J]. Information Technology & Standardization, 2017 (8): 25–27.
- [12] 肖荣美, 霍鹏. 以工业互联网为关键抓手推动制造业产业链现代化 [J]. 长沙大学学报, 2020, 34(1): 83–89.
Xiao R M, Huo P. Promoting the modernization of industrial chain in manufacturing industry with Industrial Internet as the key [J]. Journal of Changsha University, 2020, 34(1): 83–89.
- [13] 刘磊. 工业机器人远程监控诊断服务系统的设计开发 [D]. 大连: 大连理工大学(硕士学位论文), 2014.
Liu L. Development of industrial robot remote monitoring diagnostic services system [D]. Dalian: Dalian University of Technology(Master’s thesis), 2014.
- [14] 赵世一. 机械手远程监测及故障诊断系统的研究 [D]. 大连: 大连理工大学(硕士学位论文), 2016.
Zhao S Y. The study of remote monitoring and fault diagnosing system for manipulators [D]. Dalian: Dalian University of Technology(Master’s thesis), 2016.
- [15] Lee J, Bagheri B. Cyber-physical systems in future maintenance [C]. Pretoria: The 9th World Congress on Engineering Asset Management, 2014.
- [16] 张冠男, 蒋昕昊. 中国企业如何在工控领域紧跟国际脚步——工业控制系统行业现状及发展建议 [J]. 工业设计, 2016 (5): 162–163.
Zhang G N, Jiang X H. How Chinese companies keep up with the international footsteps in the field of industrial control: Current situation and development suggestions of industrial control system industry [J]. Industrial Design, 2016 (5): 162–163.
- [17] 于艺, 于佳, 井彬. 浅析高温压力传感器的发展 [J]. 科技与创新, 2015 (17): 42, 45.
Yu Y, Yu J, Jing B. The development of high temperature pressure sensor [J]. Science and Technology & Innovation, 2015 (17): 42, 45.
- [18] Marsi N, Majlis B Y, Hamzah A A, et al. Development of high temperature resistant of 500 °C employing silicon carbide (3C-SiC) based MEMS pressure sensor [J]. Microsystem Technologies, 2015, 21(2): 319–330.
- [19] 卢超, 黄漫国, 李欣, 等. 硅-蓝宝石压力传感器温度补偿研究 [J]. 测控技术, 2017, 36(4): 113–116.
Lu C, Huang M G, Li X, et al. Research on temperature compensation of silicon on sapphire pressure sensor [J]. Measurement & Control Technology, 2017, 36(4): 113–116.
- [20] 蒋昕昊, 张冠男. 我国工业软件产业现状、发展趋势与基础分析 [J]. 世界电信, 2016 (2): 13–18.
Jiang X H, Zhang G N. Industrial software industry status quo, development trend and basic analysis [J]. World Telecommunications, 2016 (2): 13–18.
- [21] 王云侯. 中国工业软件发展现状与趋势 [J]. 中国工业评论, 2018 (2): 58–63.
Wang Y H. Development status and trend of Chinese industrial software [J]. China Industry Review, 2018 (2): 58–63.
- [22] 周倩. 中国工业软件企业发展现状与瓶颈突破梯度 [J]. 中国工业和信息化, 2020 (3): 56–61.
Zhou J. Development status of Chinese industrial software enterprises and breakthrough of bottleneck gradient [J]. China Industry and Information Technology, 2020 (3): 56–61.
- [23] 王建伟. 互联网与工业融合创新 [J]. 中国信息化, 2014 (9): 31–34.
Wang J W. Integration and innovation between Internet and

- industry [J]. *China Informatization*, 2014 (9): 31–34.
- [24] 郭朝晖. 工业互联网技术发展现状及趋势分析 [J]. *自动化仪表*, 2020, 41(5): 1–4, 8.
Guo Z H. Analysis of current situation and trend on Industrial Internet technology [J]. *Process Automation Instrumentation*, 2020, 41(5): 1–4, 8.
- [25] 赵敏. 工业互联网平台的六个支撑要素——解读《工业互联网平台白皮书》[J]. *中国机械工程*, 2018, 29(8): 1000–1007.
Zhao M. Six supporting elements of Industrial Internet platform: Interpretation of *Industrial Internet platform white paper* [J]. *China Mechanical Engineering*, 2018, 29(8): 1000–1007.
- [26] 吕文晶, 陈劲, 刘进. 工业互联网的智能制造模式与企业平台建设——基于海尔集团的案例研究 [J]. *中国软科学*, 2019 (7): 1–13.
Lv W J, Chen J, Liu J. I Intelligent manufacturing and firm-level platform building in Industrial Internet: A case study of Haier [J]. *China Soft Science*, 2019 (7): 1–13.
- [27] 庄存波, 刘检华, 隋秀峰, 等. 工业互联网推动离散制造业转型升级的发展现状、技术体系及应用挑战 [J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(12): 3061–3069.
Zhuang C B, Liu J H, Sui X F, et al. Status, technical architecture and application challenges for transformation and updating of discrete manufacturing industry driven by Industrial Internet [J]. *Computer Integrated Manufacturing System*, 2019, 25(12): 3061–3069.